

福山大学で観測された地震動の特性について

鎌田輝男

Vibrational Characteristics of Earthquakes observed at Fukuyama University

Teruo KAMADA

ABSTRACT

Earthquake activity in Chugoku district is considered to be relatively low and real records of earthquake motions which can be used for aseismic design of structures are very few. So it is very important to collect strong earthquake records in this area. Earthquake observation has been held at Fukuyama University since 1988. Horizontal and vertical components of the floor acceleration induced by earthquakes were recorded by a digital disk recorder which can save digitalized data which contains preliminary and principal motion of an earthquake. Seven small earthquake records were obtained in these two years. Although acceleration level of the observed earthquake motions are low, their vibrational characteristics are considered by the spectral analysis and some features of earthquakes in Chugoku district are pointed out.

I. まえがき

地震国である日本において、建築環境の耐震安全性を計ることは、避けることのできない重要課題である。構造物の合理的な耐震設計や都市の地震防災対策の検討のためには、構造物が建設される地盤や対象とする地域において将来どのような地震が予想され、また、どのような被害が予測されるかを正しく認識することが必要であるが、そのためには、これまでにその地域がどのような地震を経験し、また、被害状況はどうであったかという歴史的な検討も重要であり、一方、現在および将来においてその地域の地震活動度がどのようなものであるかを知らねばならない。このように、地震が本来的に「予測し難いもの」であるために、過去および現在の状況から将来起きるであろう地震の様相と、それによって引き起こされるであろう地震被害の状況を予測することが、耐震安全性の検討において不可欠の要素となる。そこで、

中国地方の現状を考えてみると、幸いにして、中国地方は地震に関して比較的静穏な地域であって、歴史的にも、いわゆる、被害地震というべきものも皆無というわけではないが比較的少ないといえる。Fig.1に、歴史地震として現れる中国地方およびその周辺地域を震源とするマグニチュード6以上の地震の震源分布を示す¹⁾。この中で、近年の被害地震として著名なものは、浜田地震(1872)、芸子地震(1905)、鳥取地震(1943)などである。一方、中国地方の地震活動度を表すものとして、明治以降の地震資料に基いて、マグニチュード4以上の地震の震源分布を示したものがFig.2である。中国地方の地震の震源地域として、鳥取県中部を中心とする日本海沿岸部、三次盆地周辺の内陸部、安芸灘から伊予灘にかけての瀬戸内海部が考えられるが、これらの地域において、近年にも大きな被害地震の例が見られることに注意しなければならない。紀伊半島沖から日向灘にかけての

太平洋地域では、マグニチュード8クラスの巨大地震がしばしば発生しているが、中国地方からみれば、比較的震源までの距離が大きくなるので、地震危険度としてはそれほど大きいものとは考えられない。

一方、中国地方における地震観測は、気象庁によって広島、米子、岡山、鳥取、島根などの気象台および測候所において観測されているが、工学的な利用を目的とした地震観測は余り実施されていない。これは、中国地方の地震活動度がそれほど高いものとは考えられていないので、一般的に耐震安全性に対する関心が低いことによるものであろうことは、容易に推量できることであるが、瀬戸内海沿岸都市にみられるように、埋め立て造成地盤への都市市域の拡大とそれに伴う人口の都市集中や、都市の機能の複雑化と多様化とによって、相対的に都市の耐震安全性は低下していると言わなければならないので、比較的地震に対して安全と言われる中国地方においても、地震対策は重要な問題になってきたと言える。そこで、1988年度より福山大学において定常的な地震観測を開始し、現在までにいくつかの観測地震波形を得ることができた。観測装置は、極めて小規模なものであり、試

験的な観測の域を越えるものではなく、また、もともと中国地方では有感地震の発生回数も少ないので微小地震の観測が主体となり、工学的に重要な震度3程度以上の地震を観測することは困難であるのが現状であるが、短期間の間に良好な地震動の記録を得ることができた。本報では、観測装置の概要と、これまでに得られた地震波形の解析結果について報告する。

II. 地震観測装置の概要

福山大学は、福山市松永地区の起伏に富んだ丘陵地に立地しており、21号館振動実験解析室は、Fig.3に示すような平面および断面を有し、独立基礎によって支持された鉄骨造平屋建ての建物である。敷地地盤は、オープンカットされた100m×40mの長方形の地盤で、2方向に高さ10数mの下り斜面を持ち、さらにもう1方向には、高さ5mほどの上り斜面を持つというやや特殊な形状の地盤である。地震観測において、地盤の形状や建物の振動の影響を避けるという意味で、必ずしも、観測地点として適切とはいえないが、装置の管理の面からやむを得ない。

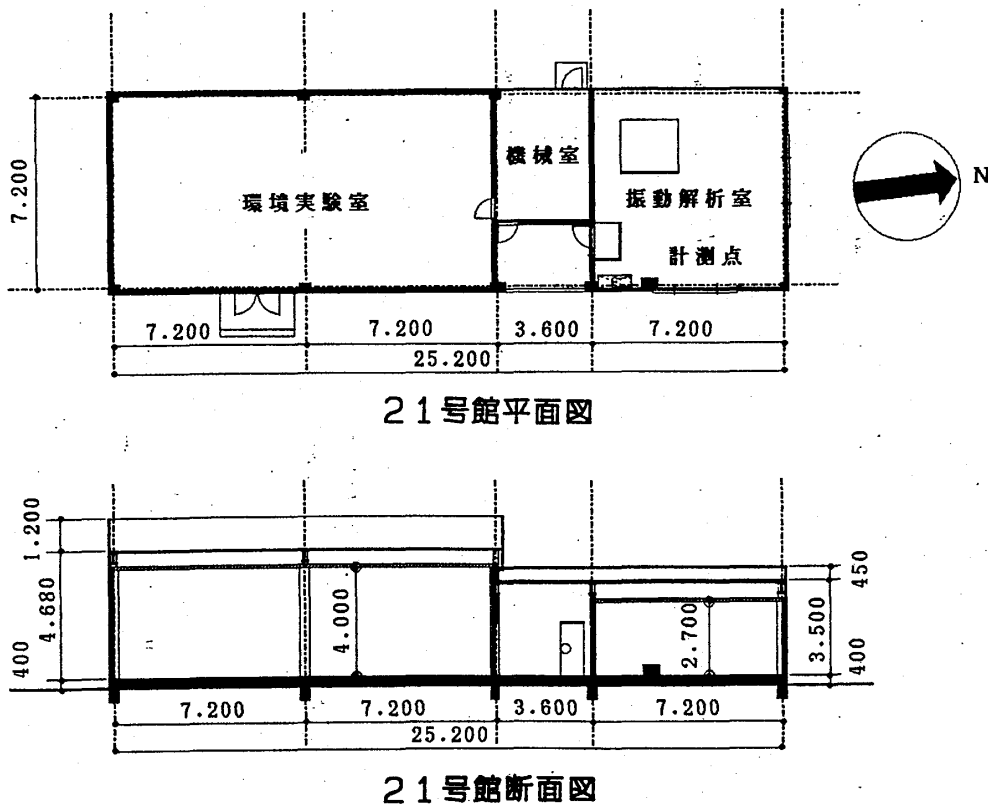


Fig.3 Plan and Section of School House No.21. Fukuyama University.

サーボ型加速度計（上下動UDおよび水平動NS成分用各1台）を室内床上に設置し、Fig.4に示すシステム構成によって地震観測を実施している。観測開始当時は、パーソナルコンピュータによって、設定レベル以上の地震動を感知してからAD変換器が作動し、設定時間（30秒ないし60秒）内の地震波形を、AD変換した数値データとしてディスクに記録するシステムであったため、地震の初動部分を得ることができなかったが、1989年9月より、記録部にプレトリガ機能を有するデジタルレコーダを採用することによって、初動から完全な地震波形を記録することが可能となった。現在のシステムでは、このプレトリガ機能によって、上下動成分に対して約1.5 galに設定された地震の感知レベルを超過した時刻よりも10秒以前からの地震動が数値化され記録されるので、完全な地震波形を収録できるようになっている。地震感知後の60秒間を含めて70秒間の地震波形は、1/100秒ご

とに数値化され、直接、5インチフロッピディスクにMS-DOSフォーマットの標準ファイルとして記録されるので、一般のパーソナルコンピュータによって、直ちにデータ解析を行うことが可能である。

本装置の特徴は、スタート機能、プレトリガ機能、起動時のタイムスタンプ、AD変換、データファイリングなどの全ての機能を、デジタルレコーダ1台（最大8チャンネルまで）でまかなっており、従来の地震観測装置に比較して簡便なものとなっている。また、AD変換部はフルレンジに対して14ビットの変換精度を持ち、システム全体としての信頼性ととも観測精度の極めて高いものである。

III. 観測地震の概要

Table 1に、1988年以降中国地方およびその近辺で発生したマグニチュード4以上の地震の諸元として、発震

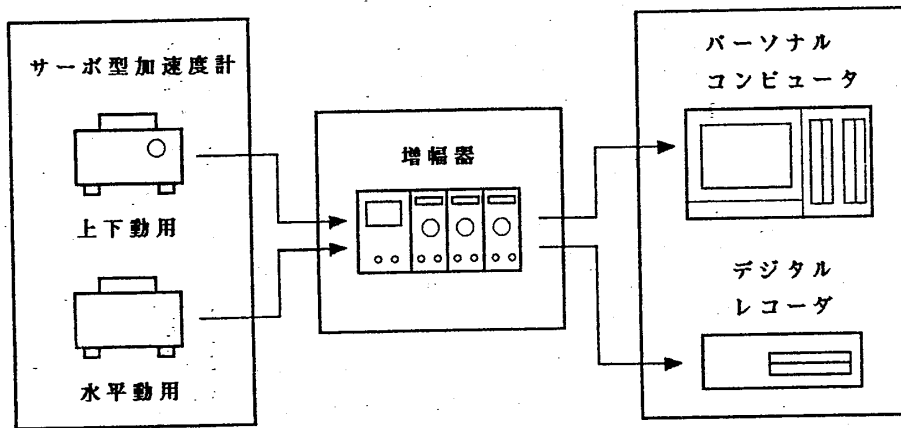


Fig.4 Earthquake observation system.

Table 1 List of earthquakes

No	発震日	震源地名	緯度	経度	深さ(km)	M	最大震度=地名	最大加速度(UD/NS gal)
	1988. 1. 1	伊予灘	33° 30'	132° 20'	58	4.9	2=宇和島、松山、下関	
	1988. 1. 31	伊予灘	33° 18'	131° 56'	72	4.2	1=大分、宇和島	
	1988. 3. 3	伊予灘	33° 33'	132° 19'	60	4.4	2=宇和島	
1	1988. 6. 14	島根、広島県境	35° 06'	132° 43'	11	4.3	1=松江、広島、福山他	1.77 2.91
2	1988. 7. 29	伊予灘	33° 41'	132° 30'	53	5.0	3=松山、呉	2.15 1.96
	1989. 2. 21	安芸灘	33° 52'	132° 22'	55	4.1	3=呉	
3	1989. 9. 25	室戸岬沖	33° 21'	134° 55'	53	5.0	2=和歌山、洲本、徳島他	1.23 3.02
4	1989.10. 27	鳥取県西部	35° 15'	133° 22'	10	5.3	3=松江、米子、境港	5.00 4.39
5	1989.11. 2	鳥取県西部	35° 16'	133° 22'	16	5.4	3=米子、境港、	6.33 4.96
6	1989.11.10	鳥取県西部	35° 16'	133° 22'	13	4.4	2=岡山、津山、米子	2.30 2.02
	1989.11.11	鳥取県西部	35° 15'	133° 22'	14	4.1	2=境港	
7	1989.11.11	瀬戸内海中部	34° 01'	133° 32'	46	4.2	2=高松	3.06 4.75

日、震央緯度および経度、震源深さ、マグニチュード、最大震度とその地名を示す。また、震源位置をFig.5に示し、福山からの距離を同心円で示す。その内、本観測装置によって観測された地震には、番号を付すことによって区別し、Table 1には、観測された最大加速度の値（上下動UD成分および水平動NS成分）を表示した。2年間の間にマグニチュード4以上の地震が僅かに12個であり、如何に中国地方の地震発生頻度が低いか分かる。1988年4月に観測を開始して以来、地震地動のレベルはそれほど大きいものではないので、観測装置が作動しても極めて微小レベルであって解析困難なものや震源の不明なものもあり、震源を特定することができ、かつ、解析可能な地震として7例を得ることができた。これらの地震は、全て、福山において有感地震として感知されたものであるが、公表された震度としては1または無感であった。しかし、その中には震度2に相当する加速度レベル（2.5~8gal）を有するものが含まれていることが分かる。

昨年より、鳥取県西部地方とする地震活動が活発となり、これまでに米子、境港などの日本海沿岸部で震度3程度の地震が多発しており、現在は既に収束期を迎えて

いると考えられているようであるが、この地域を震源とする地震が3例得られた。

本学で観測された各地震について概要を述べれば、No.1は、鳥根県中部地方を震源とする地震であり福山での震度は1であった。No.2の震源は、松山市北約15kmの伊予灘で震源深さは40kmであり、広島で震度1であった。1989年2月21日に、瀬戸内海沿岸部で局所地震があり、呉では震度3の弱震であったが、本装置は作動しなかった。No.3は、室戸市を中心とする広い範囲の地震で震源は、室戸岬沖東約70kmであり、震央距離は約200kmである。No.1からNo.3の地震は、初動部分が欠けているために完全な地震波形を得ることはできなかった。No.4からNo.6は、昨年より多発している鳥取県西部を震源とする地震であり、特にNo.5は、マグニチュード5.4であり、福山でもかなりの地震として感知され、観測された7個の地震の中では、最大の加速度の値が観測された。これらは、いずれもほぼ同程度の規模の地震であり、震源も互いに近接しており、震央距離は約90kmと考えられ、観測波形に類似点が見られることは興味深い。No.7の震源は、愛媛県新居浜市北東20kmの海底で、震源深さは約20kmであり、震央距離は約50kmである。

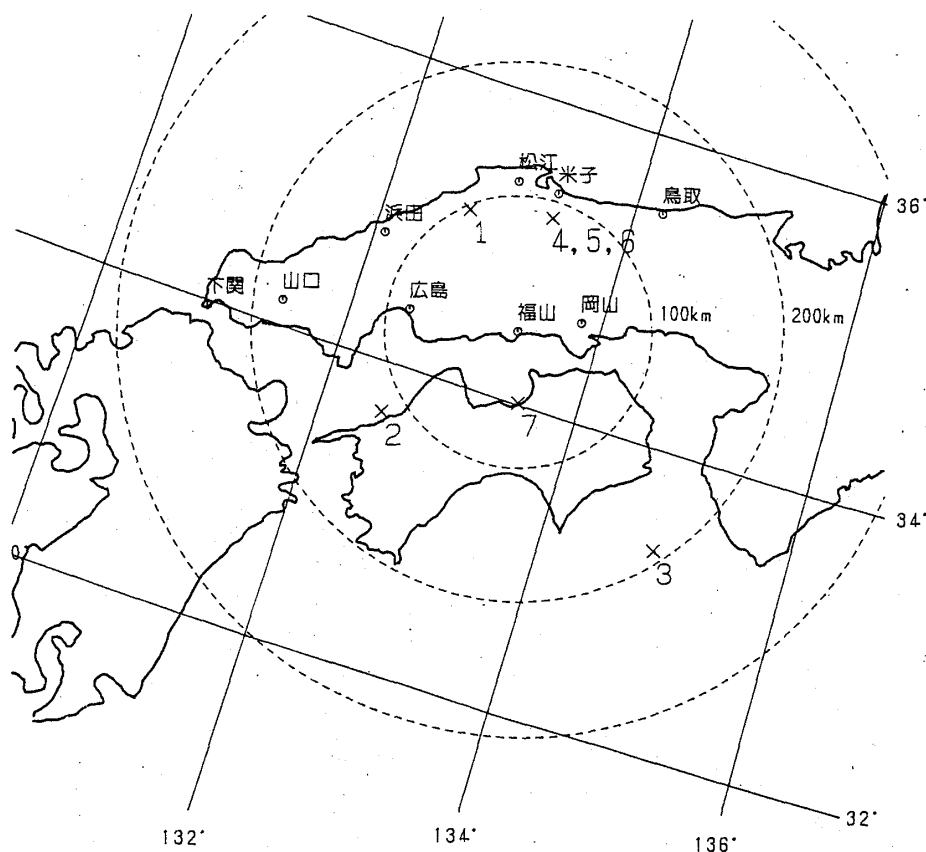


Fig.5 Origins of observed earthquakes.

Fig.6に、これらの観測地震の例として最大の加速度値を観測したNo.5の鳥取県西部(1989年11月2日)とNo.7の震央距離の最も近い瀬戸内海中部を震源とする地震について、観測された加速度波形を示す。前者の地震の10数秒後にも、余震とみられる地震が発生し、岡山県新見市で強い地震が観測されたとされるが、これは観測波形の上からは明瞭ではない。鳥取県西部を震源とする3

例の地震は、いずれも、初動から約11秒後に主要動と考えられる波動が到達するが、初動部と主要動部の最大振幅にはそれほど差はなく、むしろ、No.5およびNo.6の地震では、主要動の振幅の方が小さく、また3例ともに、最大振幅は上下動の方が大きかった。瀬戸内海を震源とする地震は2例得られたが、いずれも主要動の振幅は初動の数倍の振幅を持っている。

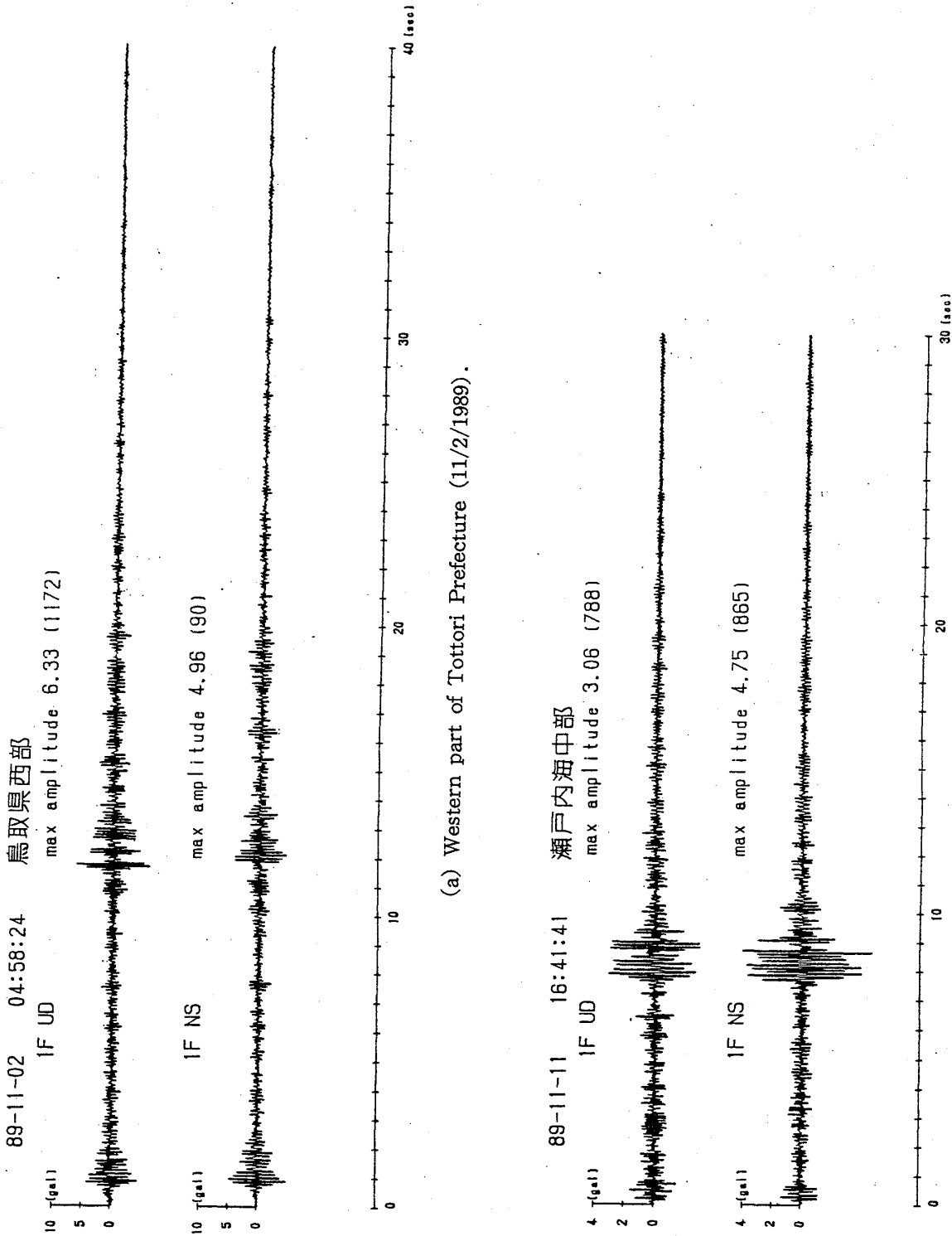


Fig.6 Examples of Earthquake Accelerograms.

IV. 観測地震波形の解析とその振動特性

得られた観測地震の特性を、主に、その振動特性を調べるために、加速度最大値を1に正規化した波形データに対して、FFTによるフーリエ解析を行い、フーリエ振幅スペクトラムの形でスペクトル特性を表現することによって波形解析を実施した。2台の加速度計は、平屋建てではあるが建物内部の床上に設置されているので、建物の固有振動の影響や、隣接する機械室に設置されていて、常時微動の影響が観測波形に混入する恐れがあるので、数値化されたデータに対して解析振動数の上限を20Hzに定め、位相の変化を起こすことなく20Hz以上の成分を急峻にカットするデジタルローパスフィルタを作成し、波形データの前処理を行っている。すなわち、デジタルレコーダによってサンプリング時間間隔 Δt 毎に数値として記録されている原時系列データ $\{X\} = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_{n-1}\}$ に対して、ローパスフィルタを通過した時系列データ $\{Y\} = \{Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}\}$ を、次式によって求めている。

$$Y_i = X_{i+j} h_j \quad (i=0,1,2,\dots,n-1) \quad (1)$$

ここに、 h_j は、ローパスフィルタ特性を実現する時系列、係数であって、次式で計算される。

$$h_j = \frac{\sin j\pi \lambda_R \cdot \sin j\pi (\lambda_T + \lambda_C)}{\lambda_R (j\pi)^2} \quad (2)$$

$$(j=0,1,2,\dots)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \lambda_C &= \omega_C / \omega_S, & \lambda_T &= \omega_T / \omega_S \\ \lambda_R &= \lambda_T / \lambda_C, & \omega_S &= 2\pi / \Delta t \end{aligned}$$

を表し、 ω_C および ω_T はともにローパスフィルタ特性の上下限振動数を規定する角振動数である。

FFTによるスペクトル解析結果は、地震の初動から2048(20.48秒)あるいは4096(40.96秒)個のデータに対して求められる平均スペクトラムと、波形データに対して256点、すなわち、2.56秒のウィンドを想定し、このウィンドの中心を0.5秒毎に移動して得られるデータに対してスペクトルを評価した移動スペクトラム(ランニングスペクトラム)として表示した。さらに、移動スペクトラムにおいては、スペクトルの最大ピークを示す振動数の時間的変化を示した。なお、スペクトル特性は、一般に、振動数に対して激しく変動するので、FFTによって評価される値に対して、1:2:1の重みをかけた移動平均を取ることによって、スペクトルの平滑化を計っている。これらのスペクトラムによって、地震波形の解析時間に対応した平均的な振動特性とその時間的変動を知ることができる。Fig.7~10に全ての波形についての解析結果(平均スペクトラム、解析波形、移動スペクトラム、スペクトルピーク振動数)を示す。

Fig.7~Fig.9の鳥取県西部の地震では、7~12Hzの振動数成分が卓越し、全体として、9~10Hzに単一のピークを持つ形を示しているのに対して、Fig.10の瀬戸内海中部の地震では、スペクトルの山が大きく3個に分離した形になっている。時間的な変動からみても、前者は、地震の始まりから終わりまで卓越する振動数が余り変化しないのに対して、後者は、初動の部分と主要動の部分でスペクトラムの形状が大きく異なり、また、この地震では、振幅の減衰が大きく、主要動の部分の平均スペクトラムの形状をきめていることが分かる。瀬戸内海中部の地震の実質的な継続時間は、鳥取県西部の地震よりも短いので、平均スペクトラムの形は、瀬戸内海中部の方が鳥取県西部のものより変動が少ないものになって現れている。移動スペクトラムが示す各時刻でのスペクトル特性の形状の変化は、瀬戸内海中部の地震は、初動から30秒程度で地震が収束していることを示しているのに反し、鳥取県西部の地震では、依然として地震動が継続し、スペクトルの変動が大きいことを示している。

短期間の間に、鳥取県西部を震源とする地震が3例得られたが、これらの地震は震源を同じくしてほぼ同程度の規模を有している。観測された3個の地震の水平NS成分の平均スペクトラムをFig.11に示す。これらのスペクトル特性は、個別に見ればピーク振動の位置やピークの高さに違いがあるものの、全般的には、極めて類似したものであることが分かる。

最後に、計測地点で測定した常時微動(速度)のスペクトル解析結果の1例をFig.12に示す。大型空調機が出すとみられる機械振動の鋭いピークが多く検出されるが、微動のレベルそのものは地震のレベルよりもはるかに低く、また、地震波形においては、20Hzのローパスフィルタ処理を行っているので、ほとんどその影響は、現れていないと考えることができる。

観測された7例の地震波形から総合的にみて、初動と主要動の部分の振幅の比率はそれほど大きくはなく、必ずしも主要動の振幅が大きいというわけではない。また、卓越する振動数成分にも顕著な差を認めることができない。さらに、水平動成分と上下動成分の両者も、振幅および振動数的に非常に似通ったものである。これらの通常の地震波形とやや異なった性格が現れたのは、観測された地震の加速度のレベルが小さく、また、観測地点が丘陵地のため、表層地盤での効果が少ないためであると考えられる。

V. まとめと今後の問題点

備後地方における地震観測ステーションとしての機能を果たすべく、福山大学において地震観測を開始した。極めて小規模ながら、高精度で信頼性の高い観測の目処

Fig.7(a)

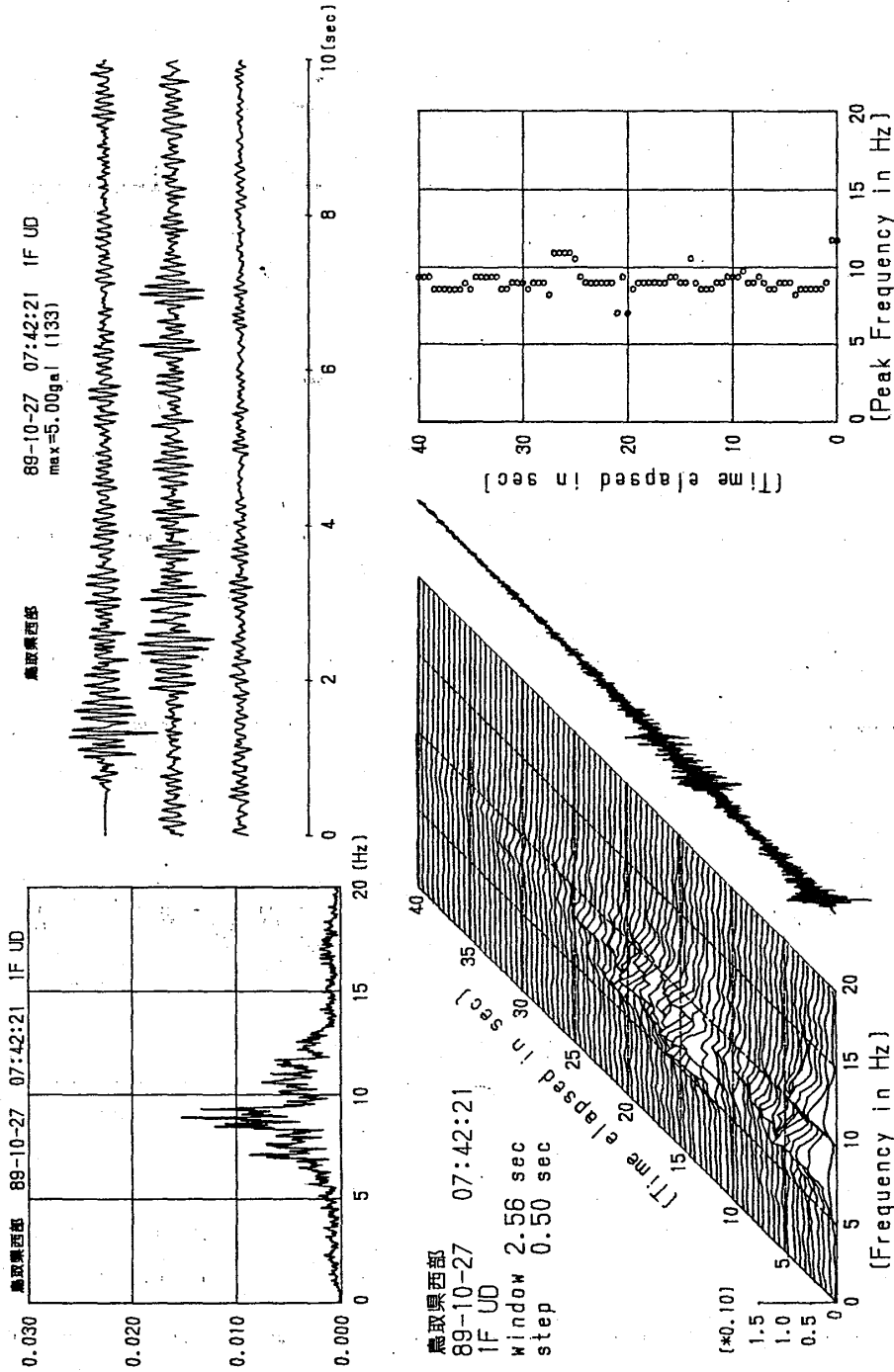


Fig.7(a) Spectral characteristics of acceleration record.

Western part of Tottori Prefecture. (10/27/89, UD component)

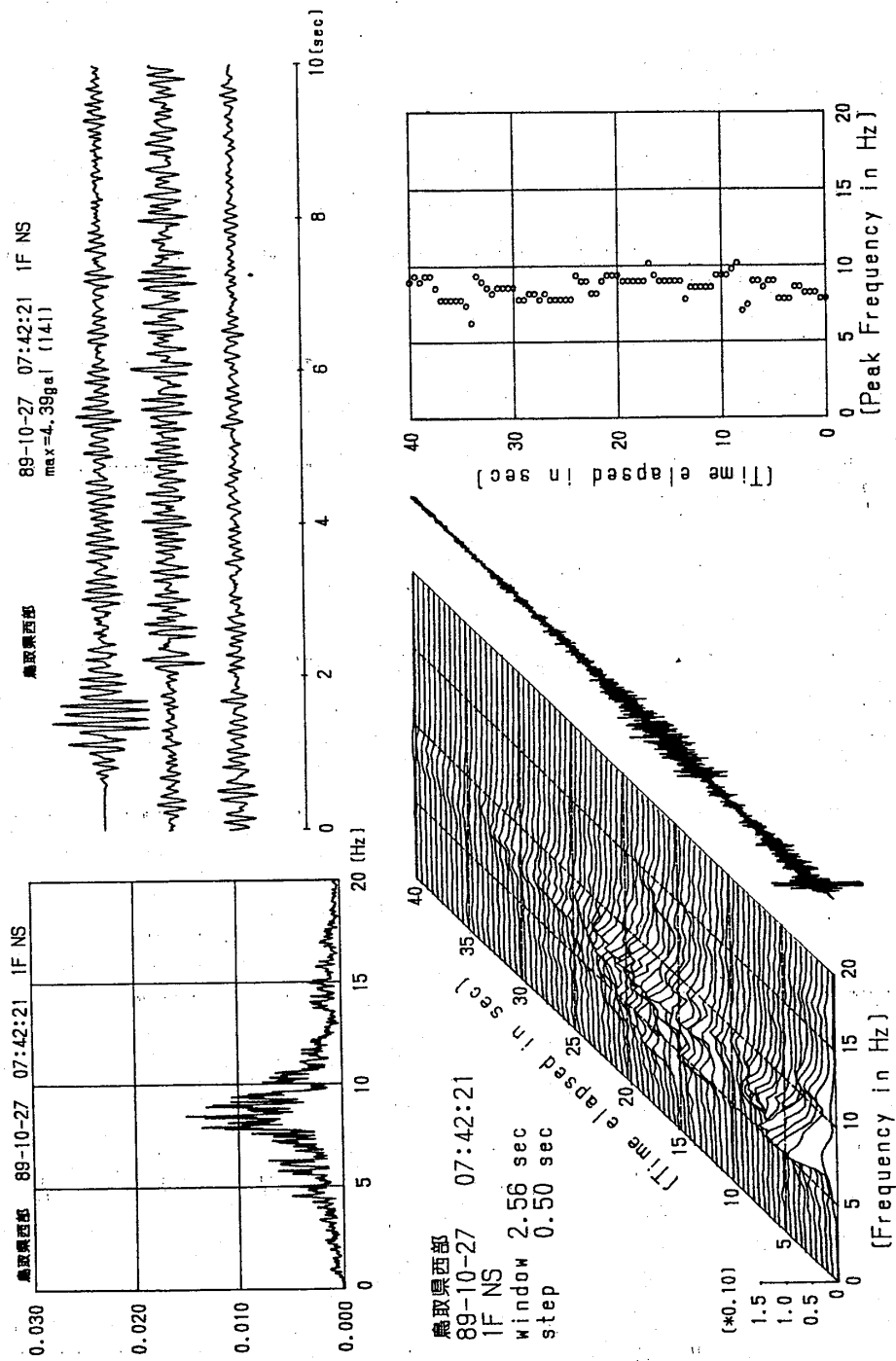


Fig.7(b) Spectral characteristics of acceleration record.
Western part of Tottori Prefecture. (10/27/89, NS component)

Fig. 8(a)

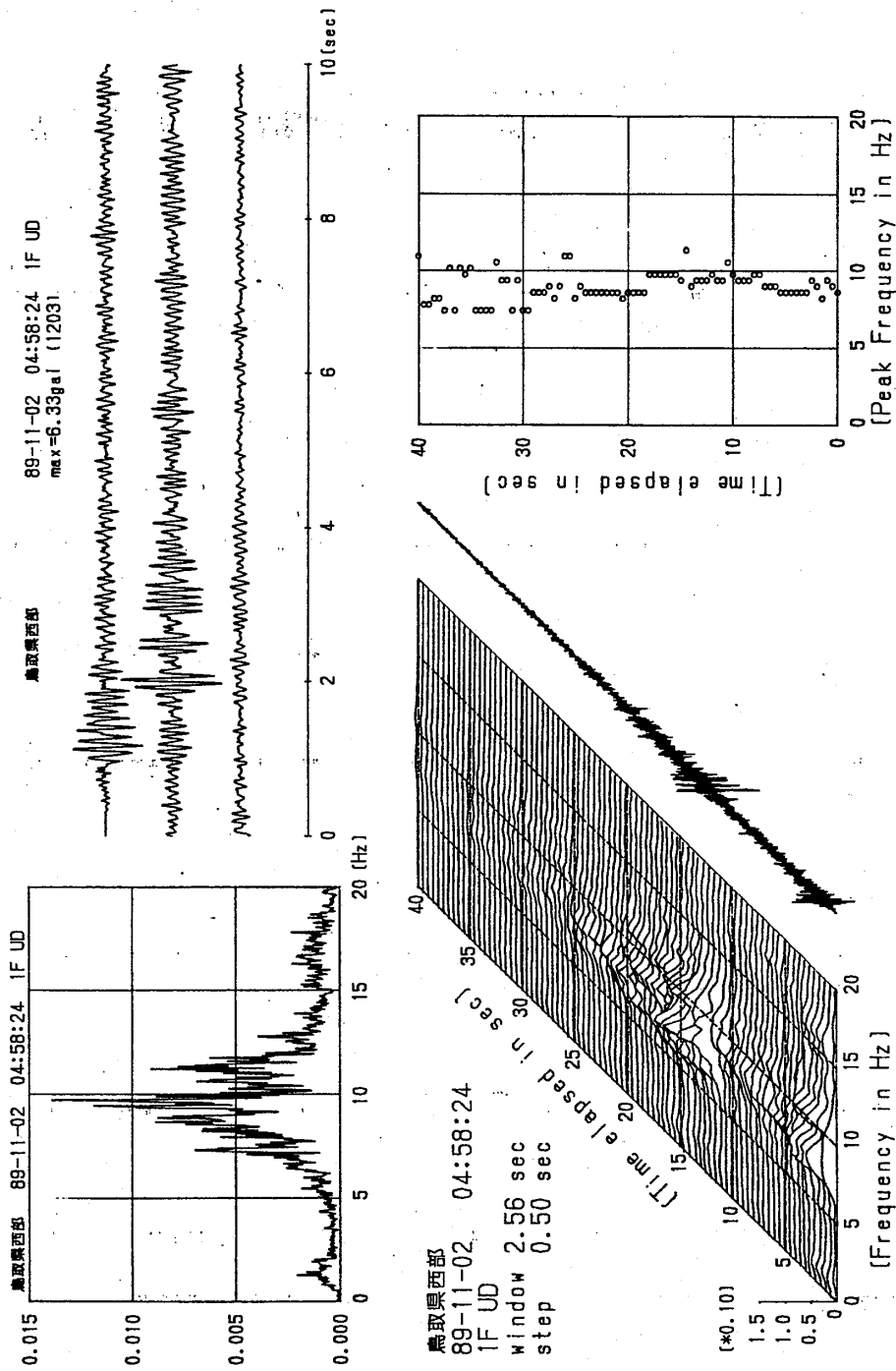


Fig.8(a) Spectral characteristics of acceleration record.

Western part of Tottori Prefecture. (11/2/89, UD component)

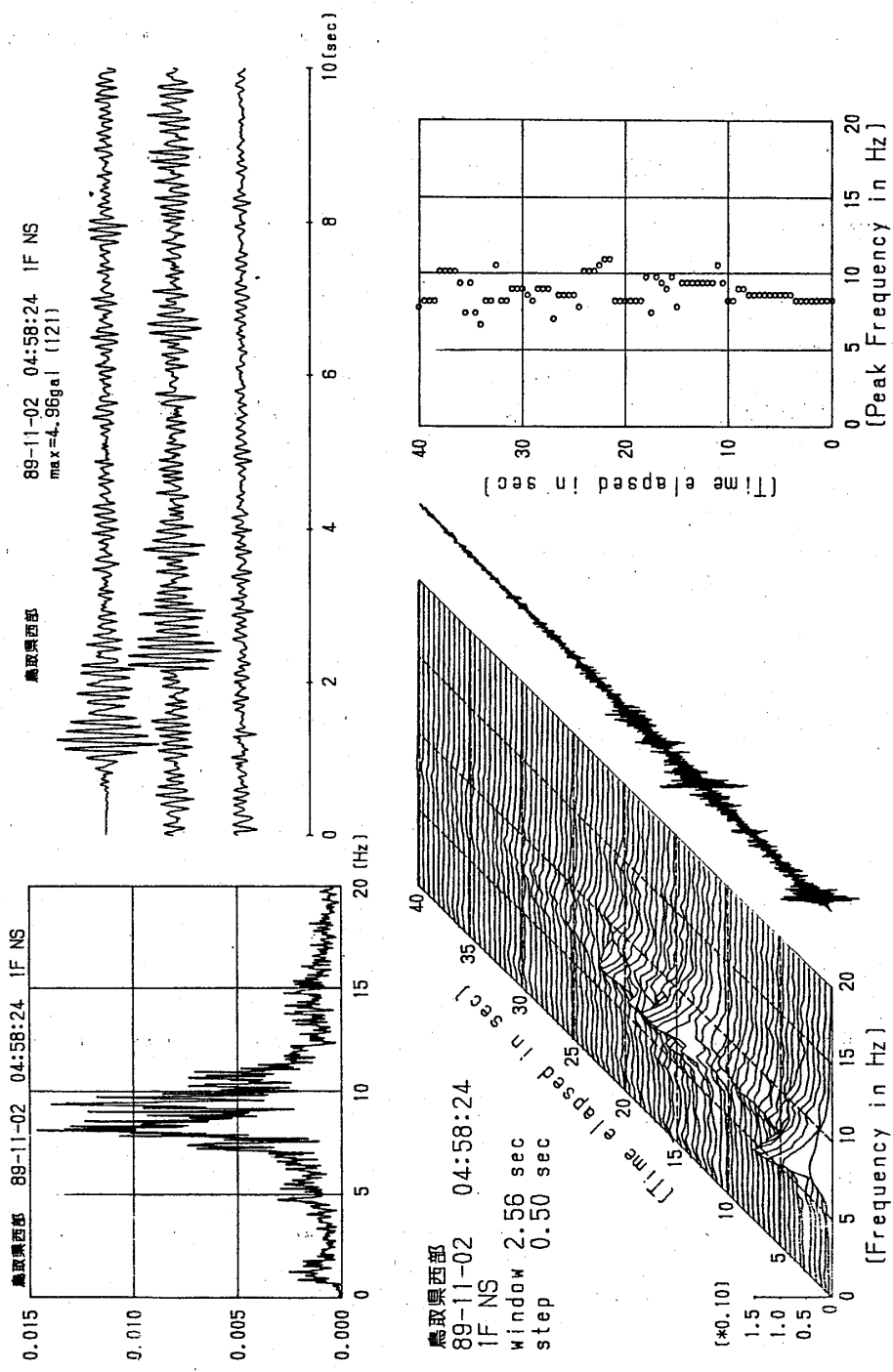


Fig.8(b) Spectral characteristics of acceleration record.
 Western part of Tottori Prefecture. (11/2/89, NS component)

Fig. 9 (a)

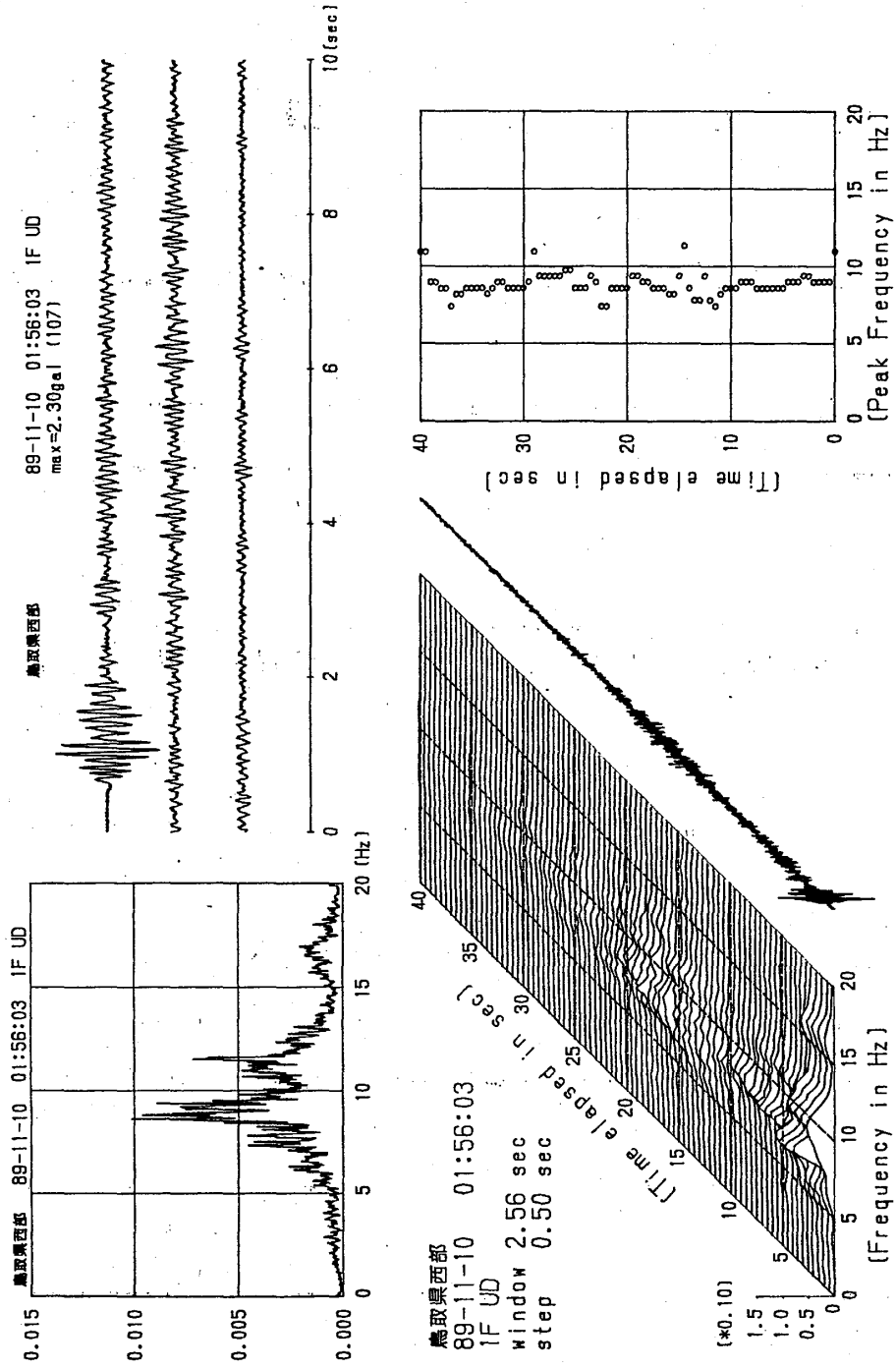


Fig.9(a) Spectral characteristics of acceleration record.

Western part of Tottori Prefecture. (11/10/89, UD component)

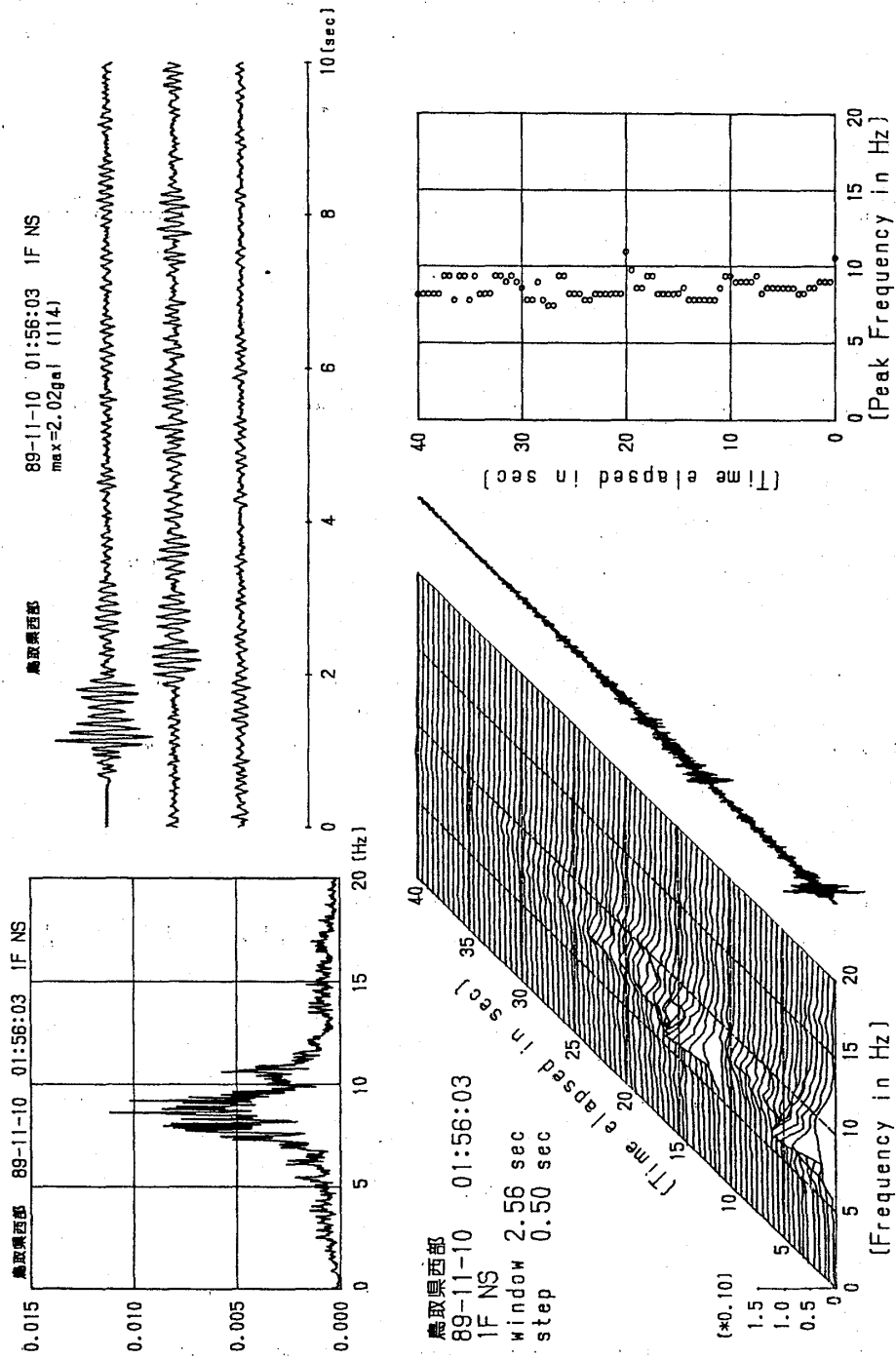


Fig.9(b) Spectral characteristics of acceleration record.
Western part of Tottori Prefecture. (11/10/89, NS component)

Fig.10(a)

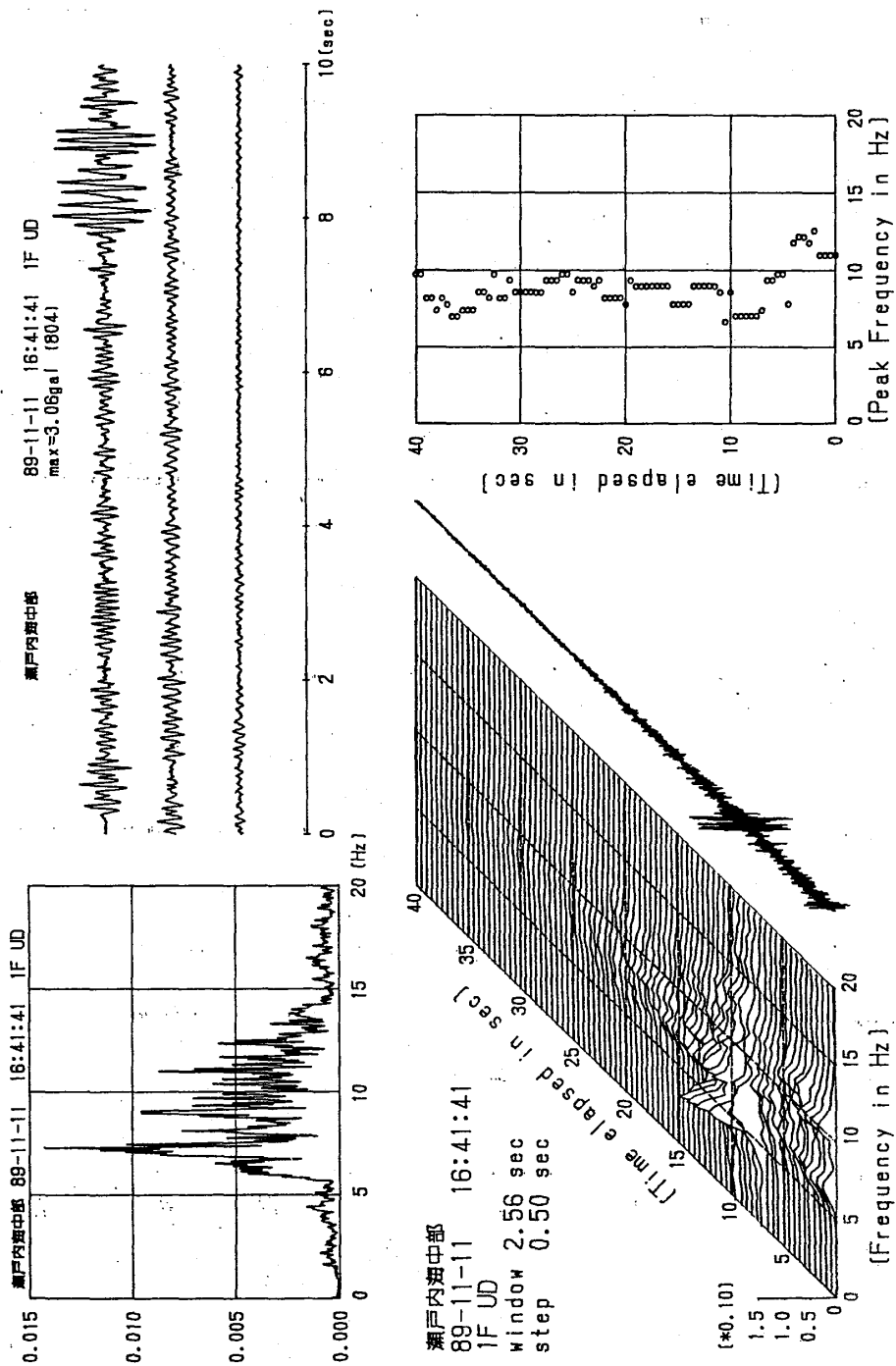


Fig.10(a) Spectral characteristics of acceleration record.
Central part of Setonaikai. (11/11/89, UD component)

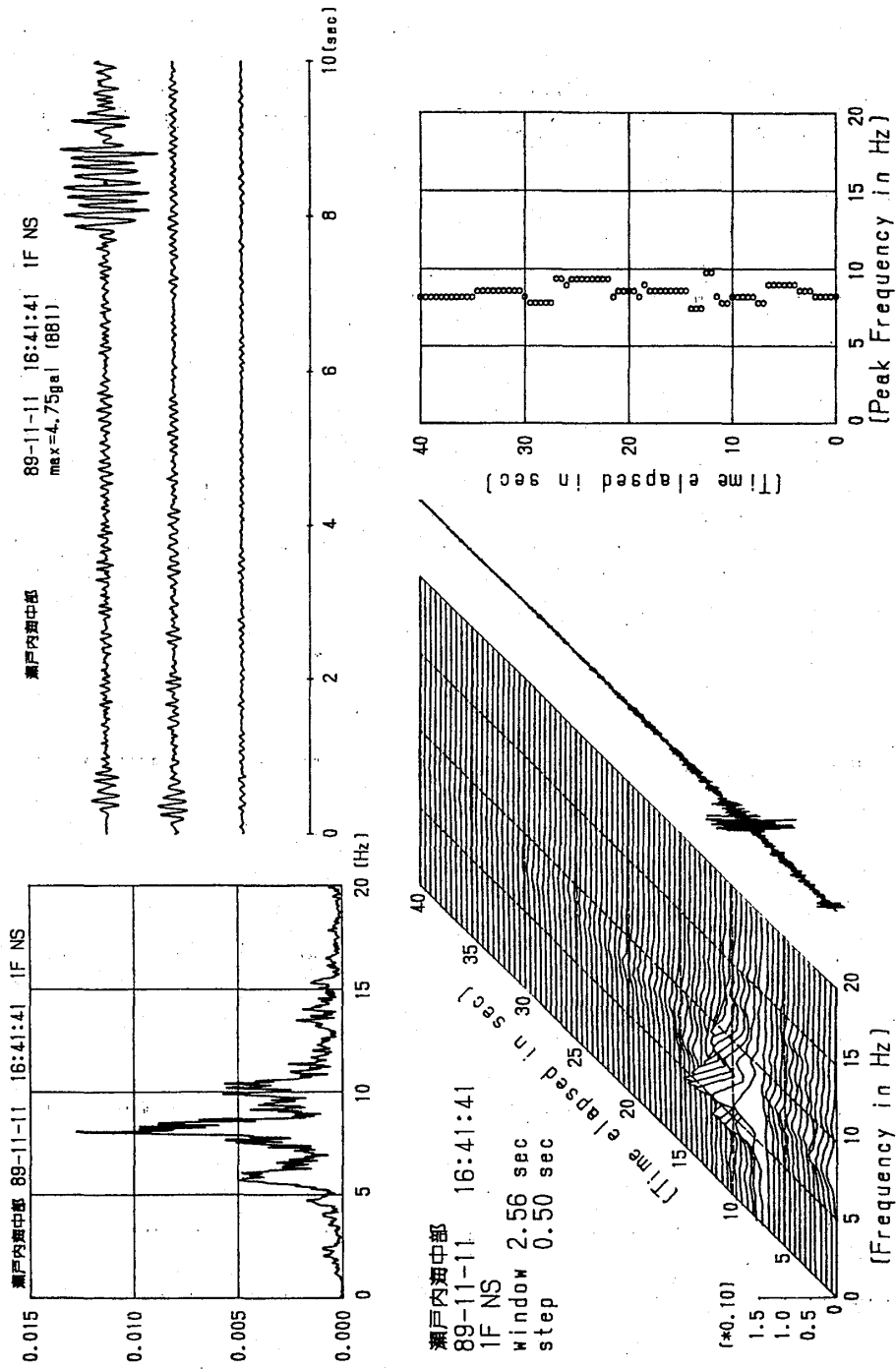


Fig.10(b) Spectral characteristics of acceleration record.
Central part of Setonaikai. (11/11/89, NS component)

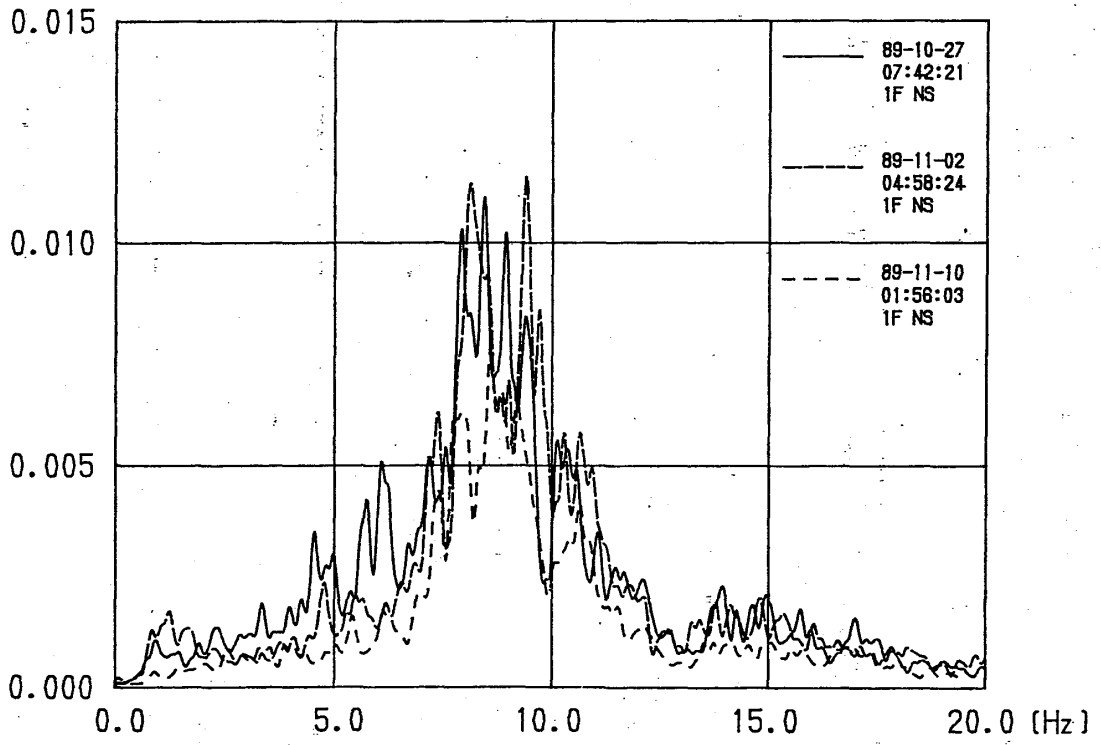


Fig.11 Spectral characteristics of acceleration record.
(NS component. Western part of Tottori Prefecture)

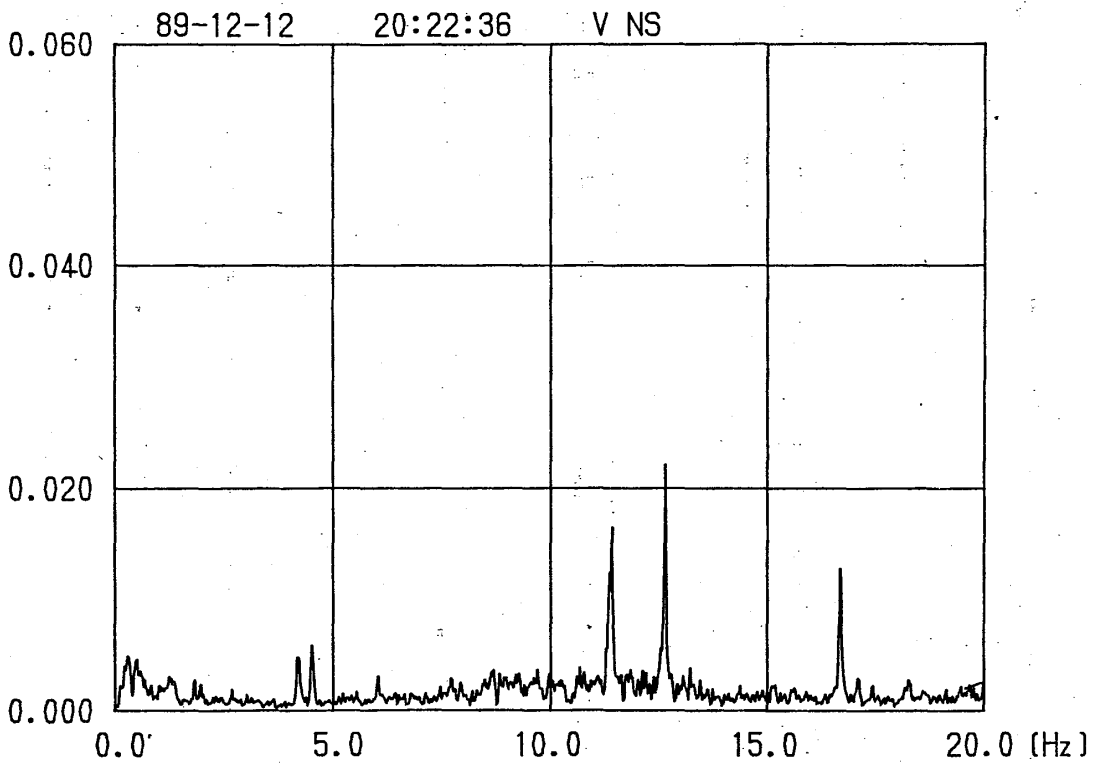


Fig.12 Spectral characteristics of microtremors of obserbation site.

を付けることができた。中国地方の地震発生頻度が少ないために、有感地震の年間発生も10前後でしかない。従って、中国地方で強い地震を観測する可能性は低いと言わざるを得ず、これまでに観測された地震もせいぜい震度1程度の大きさである。そうであればこそ、強震地動の観測が重要なのであって、さらに地震観測を継続することによって、震度2ないし3程度の地震データを得ることができるであろう。

地震観測は、現在のシステムのように水平および上下の2成分観測では不十分であるばかりではなく、計測点を室内に設けていることも好ましいことではない。地表面上に計測ベンチを作成し3成分観測を早急に実施するように計画している。さらに、耐震工学の点からは、軟弱地盤上の地震観測も重要であり、学外に軟弱地盤上の観測点を求め、本学で得られる丘陵地のデータと比較できるようにしたいと考えている。

〈参考文献〉

- 1) 宇佐美龍夫：「資料日本被害地震総覧」、東京大学出版会、1975.
- 2) 宇津 徳治「日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1880～1980」、1962.
- 3) 気象庁：「改訂 日本付近の主要地震の表（1926～1960）」、1982.
- 4) 気象庁：「地震月報別冊2 日本付近の主要地震の表（1957～1962）」、1962.
- 5) 気象庁：「地震月報別冊2 日本付近の主要地震の表（1963～1967）」、1968.
- 6) 気象庁：「地震月報」、1968.1～1986.6
- 7) 鎌田 輝男：「地震動観測システムの製作について」、福山大学工学部紀要、第11号、1989. 3, pp.73-77.
- 8) 鎌田 輝男：「福山大学における地震観測について」、日本建築学会中国支部研究報告集、第16巻、1990. 3.
- 9) 小堀 鐸二、鎌田 輝男：「微動の相関数に基いた構造物の振動特性について」、第14回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、1977. 8, pp.363-366.